

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт: Физико-технический

Специальность: 18.05.02 Химическая технология материалов современной энергетики

Кафедра: «Химическая технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
Проект цеха разделения редкоземельных и радиоактивных элементов, производительностью 100 тонн в год по оксидам редкоземельных элементов

УДК 661.86/.87.012.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0411	Тундешева Татьяна Борисовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ХТРЭ	Егоров Н.Б.	к.х.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Тухватулина Л.Р.	к.ф.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ХТРЭ	Акимов Д.В.			

По разделу «Автоматизация процесса»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭАФУ	Вильнина А.В.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой ХТРЭ	Крайденко Р.И.	д.х.н., доцент		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 18.05.02
«Химическая технология материалов современной энергетики»,

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р1	Демонстрировать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания и детальное понимание научных принципов профессиональной деятельности
Р2	Ставить и решать инновационные задачи, связанные с получением и переработкой материалов и изделий ядерного топливного цикла, с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии материалов современной энергетики
Р3	Эксплуатировать и совершенствовать действующие, разрабатывать и внедрять новые современные высокотехнологичные процессы и линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, контролировать расходование сырья, материалов, энергетических затрат
Р4	Обеспечивать радиационную безопасность, соблюдать правила охраны здоровья и труда при проведении работ, выполнять требования по защите окружающей среды; оценивать радиационную обстановку; осуществлять контроль за сбором, хранением и переработкой радиоактивных отходов различного уровня активности с использованием передовых методов обращения с РАО
Р5	Уметь планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования в области изучения свойств и технологии материалов современной энергетики с использованием новейших достижений науки и техники, уметь обрабатывать и критически оценивать полученные данные, делать выводы, формулировать практические рекомендации по их применению; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности

P6	Разрабатывать новые технологические схемы, рассчитывать и выбирать оборудование, применять средства автоматизации, анализировать технические задания и проекты с учетом ядерного законодательства
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Представлять современную картину мира на основе целостной системы естественнонаучных и математических знаний, ориентироваться в ценностях бытия, жизни, культуры; иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем
P8	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области изучения свойств, методов и технологий получения и переработки материалов современной энергетики
P9	Применять иностранный язык в сфере коммуникаций и профессиональной деятельности, представлять результаты научных исследований и разработок в виде отчетов, публикаций, публичных обсуждений
P10	Уметь эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, руководить командой, быть способным оценивать, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность; следовать корпоративной культуре организации, кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Физико-технический

Направление подготовки (специальность): 18.05.02 Химическая технология материалов современной энергетики

Кафедра: «Химическая технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) Р.И. Крайденко

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

дипломного проекта

Студенту:

Группа	ФИО
0411	Тундешева Татьяна Борисовна

Тема работы:

Проект цеха разделения редкоземельных и радиоактивных элементов, производительностью 100 тонн в год по оксидам редкоземельных элементов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 15 ноября 2016 года, №9738/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10 января 2017 года
--	---------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Цех водного выщелачивания хлоридов редкоземельных и радиоактивных элементов производительностью 100 тонн в год по оксидам редкоземельных элементов. Проектируемый аппарат с механическим перемешиванием для водного выщелачивания смеси хлоридов работает в непрерывном режиме. Данные об исходном составе сырья: $[\sum \text{PЗЭPO}_4]=90,63\%$; $[\text{Th}_3(\text{PO}_4)_4]=7,10\%$; $[\text{U}_3(\text{PO}_4)_4] = 1,24\%$; $[\text{FeTiO}_3] = 1,03\%$. Степень вскрытия концентрата – 99,5 %; ильменита – 0,3 %. Расход гидроксида натрия, с содержанием 450 г/л, 150 % от стехиометрического. Степень водного выщелачивания хлоридов, после хлорирования: PЗЭ – 95 %; Th – 0,01 %; U – 0,05 %; Fe – 0,10 %
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Введение. ТЭО. 2. Аналитический обзор существующих методов. 3. Теория выбранного процесса. Разработка и описание аппаратурно-технологической схемы. 4. Расчетная часть. 4.1. Расчет материального баланса. 4.2. Расчет теплового баланса. 4.3. Аппаратный расчет. Расчет геометрии и габаритов аппаратов технологической схемы. 4.4. Механический расчет основного аппарата. 4.5. Гидравлический расчет. 4.6. Энергетический расчет. 5. Автоматизация процесса. 6. Строительная часть. 7. Охрана труда и техника безопасности. 8. Расчет периода окупаемости предприятия.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Блок-схема с материальными потоками. 2. Аппаратурно-технологическая схема. 3. План размещения оборудования. 4. Разрез цеха. 5. Сборочный чертеж основного аппарата А1 (ГОСТ 2.001-93..2.034-83). 6. Технико-экономические показатели.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	к.ф.н., доцент, Тухватулина Л.Р.
Социальная ответственность	ассистент, Акимов Д.В.
Автоматизация процесса	к.т.н., доцент, Вильнина А.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Все разделы ВКР написаны на русском языке	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	3 октября 2016 года
---	---------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ХТРЭ	Егоров Н.Б.	к.х.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0411	Тундешева Татьяна Борисовна		

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

1. Определения:

Водородный показатель (pH) – мера активности (в очень разбавленных растворах она эквивалентна концентрации) ионов водорода в растворе, и количественно выражающая его кислотность, вычисляется как отрицательный (взятый с обратным знаком) десятичный логарифм активности водородных ионов, выраженной в молях на один литр.

Выщелачивающий раствор – раствор, содержащий необходимые для извлечения полезного компонента реагенты и подаваемый в аппараты для осуществления процесса выщелачивания.

Выщелачивание – перевод в раствор (обычно водный) одного или нескольких компонентов твёрдого вещества с помощью водного или органического растворителя, часто при участии газов окислителей или восстановителей.

Извлечение – количество металла в конечном или промежуточном продуктах технологических работ, выраженное в весовых единицах или процентах к общему весу полезного компонента в пробе, в поступающих на переработку растворах или находившегося в недрах.

Отношение Т:Ж – количество выщелачивающего раствора, приходящееся на весовую единицу выщелачиваемой горнорудной массы, обеспечивающее заданное извлечение полезного компонента из месторождения или его части (отношение количества поданного выщелачивающего раствора к горнорудной массе).

Растворение – физико-химический процесс, протекающий между твердой и жидкой фазами и характеризующийся переходами твердого вещества в раствор. Растворенным веществом считается тот из компонентов, который при обычных условиях находится в агрегатном состоянии, отличном от агрегатного состояния растворителя.

Реагент – химическое вещество (обычно в виде водного раствора), используемое для выщелачивания или ускорения извлечения полезного компонента.

Степень извлечения – количество извлеченного из минерала полезного компонента (отношение веса добытого металла к его содержанию в минерале). Обычно выражается в % относительно исходного содержания, реже в долях единицы.

Техника безопасности (охрана труда) – система технических, санитарно-гигиенических и правовых мероприятий, обеспечивающих безопасные для жизни и здоровья условия труда работающих.

Удельный расход реагента – количество реагента, расходуемого на извлечение единицы массы полезного компонента (кг/кг) или на взаимодействие с его минеральной массой (кг/т, %).

Фильтрация – движение жидкости в пористой среде под действием гравитации или градиента напора.

2. Обозначения и сокращения:

АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

БВФ – барабанный вакуум фильтр;

ВР – выщелачивающий раствор;

ВС – воздух сжатый;

ГП – готовый продукт (продукция);

ИИ – ионизирующее излучение;

ППР – плановый предупредительный ремонт;

РЗМ – редкоземельные металлы;

РЗЭ – редкоземельные элементы;

РС – рудное сырье;

СГП – склад готовой продукции;

ФСА – функциональная схема автоматизации.

3. Нормативные ссылки:

ГОСТ 23838-89 Здания предприятий. Параметры.

СП 56.13330.2011 Производственные здания.

СП 29.13330.2011 Полы.

СП 30.13330.2012 Внутренний водопровод и канализация зданий.

СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81.

ГОСТ 29057-91 Костюмы мужские для защиты от нетоксичной пыли.

Технические условия.

ГОСТ 12.4.072-79 ССБТ. Сапоги специальные резиновые формовые, защищающие от воды, нефтяных масел и механических воздействий. Технические условия.

ГОСТ 27652-88 Костюмы мужские для защиты от кислот. Технические условия.

ГОСТ 27653-88 Костюмы мужские для защиты от механических воздействий, воды и щелочей. Технические условия.

ГОСТ 12.4.127-83 ССБТ. Обувь специальная. Номенклатура показателей качества.

ГОСТ 12.4.028-76 ССБТ. Респираторы ШБ-1 "Лепесток". Технические условия.

ГОСТ 12.4.153-85 ССБТ. Очки защитные. Номенклатура показателей качества.

ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия.

ГОСТ 12.4.121-83 ССБТ. Противогазы промышленные фильтрующие. Технические условия.

ГОСТ 12.1.003.2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

ГОСТ 24.302-80 Система технической документации на АСУ. Общие требования к выполнению схем.

ГОСТ 24.303-80 Система технической документации на АСУ. Обозначения условные графические технических средств.

Реферат

Выпускная квалификационная работа 122 с., 17 табл., 4 рис., 69 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: редкоземельные элементы (РЗЭ), водное выщелачивание, монацит, торий, уран.

Цель работы: проектирование цеха разделения РЗЭ и РЭ, производительностью 100 тонн в год по оксидам РЗЭ.

Объектом исследования является аппарат, в котором осуществляется водное выщелачивание хлоридов РЗЭ и РЭ.

Предметом исследования является цех, в котором будет осуществляться процесс водного выщелачивания хлоридов РЗЭ и РЭ.

В ходе написания выпускной квалификационной работы был проведен аналитический обзор литературных источников по свойствам РЗЭ и способам их переработки. Были описаны результаты проведенных исследований влияния хлорида аммония на рН растворов хлоридов лантана и церия. Произведены термодинамические расчёты, расчёты материального баланса всех рассматриваемых стадий переработки руды, аппаратурный и механический и расчёт основного проектируемого аппарата. Кроме того были составлены и описаны аппаратурно-технологическая схема и функциональная схема автоматизации процесса. На основании расчетов и их анализа был выполнен сборочный чертеж основного аппарата – агитатора. Составлен план размещения технологического оборудования в проектируемом цехе. Рассмотрены основные опасные и вредные производственные факторы, проработаны мероприятия по охране труда в проектируемом цехе. Проведено технико-экономическое обоснование разрабатываемой технологии и проектируемого цеха.

В дальнейшем планируется поиск оптимальных режимов работы оборудования с последующей модернизацией технологической схемы.

Оглавление

Введение.....	13
1 Обзор литературы	15
1.1 Общие сведения о редкоземельных элементах.....	15
1.1.1 Основные свойства и области применения	15
1.1.2 Обзор мирового и российского рынка редкоземельных металлов	18
1.2 Аналитический обзор рассматриваемого процесса.....	21
1.2.1 Типы руд и минералы редкоземельных металлов	21
1.2.2 Краткий обзор существующих методов производства и оборудования	22
1.3 Аналитический обзор процесса выщелачивания и растворения	24
1.3.1 Теория процессов	24
1.3.2 Термодинамика процесса выщелачивания.....	27
1.3.3 Кинетика процесса выщелачивания.....	31
2 Объект и методы исследования	35
3 Расчеты и аналитика	36
3.1 Описание технологической схемы	36
3.2 Материальный расчет	38
3.2.1 Материальный баланс стадии водного выщелачивания	39
3.3 Тепловой баланс	50
3.4 Аппаратурный расчет	51
3.4.1 Аппаратурный расчет агитатора.....	51
3.4.2 Аппаратурный расчет барабанной вращающейся печи	53
3.5 Механический расчет.....	55
3.6 Гидравлический расчет.....	68

3.7 Строительная часть	69
3.7.1 Основные конструктивные элементы здания	70
3.7.2 Водоснабжение	72
3.7.3 Канализация	73
3.7.4 Отопление	73
3.7.5 Вентиляция	74
3.7.6 Антисейсмические мероприятия	74
4 Результаты проведенного исследования	75
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	78
5.1 Расчет численности рабочих	78
5.2 Расчет годового фонда заработной платы руководителей, специалистов, основных и вспомогательных рабочих цеха, работающих в смену	85
5.3 Расчет годового фонда заработной платы руководителей цеха.....	85
5.4 Расчет капитальных затрат.....	85
5.5 Расчет технологических затрат.....	89
5.6 Калькуляция себестоимости передела	90
6 Социальная ответственность	92
6.1 Общая характеристика производства.....	92
6.2 Радиационная безопасность	94
6.3 Микроклимат	97
6.4 Электробезопасность	99
6.5 Мероприятия по защите от шума и вибрации.....	100
6.6 Электроосвещение	102
6.7 Пожарная безопасность	103
7 Автоматизация процесса	105

7.1 Описание функциональной схемы автоматизации.....	106
7.2 Перечни технологических параметров, подлежащих контролю, регулированию, сигнализации.....	108
7.3 Подбор контрольно-измерительных приборов.....	109
7.4 Автоматизация процесса с использованием ЭВМ.....	112
Заключение	115
Список использованных источников	116
Приложение А	
Приложение Б	
Приложение В	
Приложение Г	
Графический материал на отдельных листах:	
ДП ФЮРА.061542.012 ПТС Принципиальная технологическая схема	
ДП ФЮРА.061542.012 АТС Аппаратурно технологическая схема	
ДП ФЮРА.061542.012 ПРО План размещения оборудования	
ДП ФЮРА.061542.012 ПРЦ Поперечный разрез цеха	
ДП ФЮРА.061542.012 СБ Сборочный чертеж	
ДП ФЮРА.061542.012 ТЭП Техничко-экономические показатели	

Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ) – это группа химических элементов, в состав которой входят лантан (La), лантаноиды (Ln), а также скандий (Sc) и иттрий (Y). Все редкоземельные элементы являются металлами, именно поэтому довольно часто употребляется термин редкоземельные металлы (РЗМ) [1].

В настоящее время потребность РЗЭ в мире имеет устойчивый рост, именно этим объясняется актуальность данной темы. За последние 50 лет объем потребления увеличился более чем в 25 раз (с 5 тыс. тонн до 125 тыс. тонн в год). Диапазон применения рассматриваемых металлов в настоящее время довольно широк от лекарственных препаратов до космических ракет. Главные сферы применения РЗЭ: выпуск магнитов (22 % от объема потребления РЗЭ), современные катализаторы в нефтехимической промышленности (18 %), различные конструкционные материалы (около 19 %), высококачественная оптика, а также стекла и приборы на их основе (около 15 %) [2]. С целью удешевления РЗЭ осуществляется развитие традиционных и поиск новых технологических схем переработки сырья, а также поиск способов получения индивидуальных элементов высокой чистоты.

Российская Федерация обладает богатейшими запасами редкоземельного сырья и всем необходимым для широкого их использования промышленностью, в первую очередь металлургией. Тем не менее, индивидуальные РЗЭ и их смеси для нужд российского металлургического комплекса приобретаются у зарубежных производителей, крупнейшим из которых является Китай [3]. Сложившаяся ситуация приводит к сырьевой зависимости от импортных производителей.

Сдерживает разработку месторождений РЗЭ в мире то, что минералы, содержащие РЗЭ, в большинстве случаев содержат и радиоактивные элементы (РЭ) такие как уран (U) и торий (Th), а также продукты их распада, следовательно, будут иметь место радиоактивные отходы, требующие

захоронения. Все расходы по ходу металлургического передела, включая затратное хранение радиоактивных отходов, будут заложены в себестоимость конечного продукта, цена которого будет не конкурентно способной. Данная ситуация требует решения. Одно, из которых это поиск новых способов переработки руд и минералов, содержащих РЗЭ, позволяющих осуществить комплексную разработку месторождений с возможностью регенерации используемых в технологической цепочке реагентов и высокой степенью извлечения РЗЭ и других разделяемых веществ из перерабатываемого сырья. Выполнение этих требований позволит снизить себестоимость конечного продукта.

Цель работы: проектирование цеха разделения РЗЭ и РЭ, производительностью 100 тонн в год по оксидам РЗЭ.

Объектом исследования является аппарат, в котором осуществляется водное выщелачивание хлоридов РЗЭ и РЭ.

Предметом исследования является цех, в котором будет осуществляться процесс водного выщелачивания хлоридов РЗЭ и РЭ.

Данная выпускная квалификационная работа (ВКР) имеет практическую новизну, которая заключается в возможности использования разработанной технологической схемы для переработки монацитового концентрата, с целью извлечения оксидов РЗЭ.

Научная новизна ВКР состоит в том, что предложено изменить схему переработки гидроксидного кека, получающегося при щелочном вскрытии монацитового концентрата.

1 Обзор литературы

1.1 Общие сведения о редкоземельных элементах

1.1.1 Основные свойства и области применения

РЗЭ – это группа, включающая в себя 17 элементов Периодической таблицы химических элементов Д.И. Менделеева: La и 14 Ln, а также Sc и Y. Название «редкоземельные» дано в связи с тем, что они, во-первых, сравнительно редко встречаются в земной коре и, во-вторых, образуют тугоплавкие, практически не растворимые в воде оксиды (такие оксиды в начале XIX в. и ранее назывались «землями»).

В научной литературе встречаются также термины лантаниды и редкие земли; в первый из них вкладывают то же понятие, что и в лантаноиды. Что касается второго, то он господствовал на протяжении, по крайней мере, 130 лет из 165-летнего периода истории РЗЭ. Сейчас это название звучит как архаизм, поскольку старинное понятие «земли» исчезло из обихода химиков. Что касается «редкости», то, как показывают новейшие геохимические исследования, они отнюдь не являются редкими элементами [1].

К РЗЭ относят 17 элементов периодической системы: скандий (Sc, 21), иттрий (Y, 39), лантан (La, 57), церий (Ce, 58), празеодим (Pr, 59), неодим (Nd, 60), прометий (Pm, 61), самарий (Sm, 62), европий (Eu, 63), гадолиний (Gd, 64), тербий (Tb, 65), диспрозий (Dy, 66), гольмий (Ho, 67), эрбий (Er, 68), тулий (Tm, 69), иттербий (Yb, 70), лютеций (Lu, 71). Зачастую РЗЭ делят на две подгруппы: цериевую и иттриевую. К цериевой подгруппе относятся «легкие» металлы – La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu; к иттриевой относятся «тяжелые» металлы – Y, Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Основной причиной трудностей в получении чистых индивидуальных элементов, является поразительное сходство РЗЭ между собой. Достижение высокой степени чистоты металла представляется сложной задачей, т.к. сильно зависит от чистоты исходного образца.

Если элементы цериевой группы были выделены в свободном состоянии еще в конце XIX в. и начале XX в. и их свойства изучены химиками довольно подробно, то иная картина имеет место для иттриевых элементов [1].

В литературе по РЗЭ величины многих констант (температуры плавления и кипения, плотность, электропроводность) зачастую разнятся; это, по-видимому, следует объяснять тем, что различные исследователи имели дело с образцами разной степени чистоты. Поэтому в ряде случаев приводят не определенную величину той или иной константы, а интервал между крайними величинами [1].

Все больше внимания ученых и даже целых научных коллективов привлекает своеобразные физические и химические свойства металлов.

Описание физических свойств металлов следует начинать с их внешнего вида. РЗЭ в свободном состоянии обладают серебристо-белым цветом с ярко выраженным блеском, причем по блеску они схожи с такими металлами, как металлическое железо (Fe) или серебро (Ag) [4]. При рассмотрении плотности редкоземельных элементов в ряду La–Lu, можно выявить некую закономерность, т.е. с увеличением атомного номера увеличивается и плотность данных элементов. Исключением в таком случае является аномальная плотность у европия и иттербия из-за особенности кристаллической решетки у этих элементов. Плотность РЗЭ варьируется от 4,472 г/см³ до 9,849 г/см³ [1].

Подобная закономерность (увеличение с ростом атомного номера) просматривается в ряду величин температур плавления редкоземельных элементов. Исключения составляют аномальные величины у церия, европия и иттербия. В целом РЗЭ обладают большой тугоплавкостью. Температуры кипения большинства металлов высоки, минимальные значения наблюдаются опять же у европия и иттербия. Температуры плавления у элементов варьируется от 804 °С до 1750 °С [1].

Механические свойства РЗМ изучены недостаточно. Известно, однако, что их твердость невелика и слегка увеличивается по ряду La–Lu. РЗЭ,

имеющие высокую степень чистоты весьма пластичны и легко поддаются деформации. Тот факт, что механические свойства металлов зависят от содержания примесей, является также мало изученным [1].

РЗЭ являются слабыми проводниками электричества, их электропроводность составляет порядка 10^{-8} Ом^{-1} . Все РЗЭ парамагнитны, некоторые из них проявляют ферромагнитные свойства (гадолиний, диспрозий, гольмий). α –лантан переходит в состояние сверхпроводимости при 4,9 К, β –лантан при 5,85 К. У других РЗЭ сверхпроводимость не обнаружена даже при температурах ниже десятых долей градуса Кельвина [4].

Перейдем к химическим особенностям металлов. Наиболее характерная степень окисления +3, хотя некоторые металлы проявляют +2 и +4. Так как РЗЭ являются химически активными, то они легко вступают во взаимодействие со многими неметаллами. Разлагают воду, выделяя тем самым водород. Легко растворяются в соляной, серной, и азотной кислотах, но устойчивы в крепких растворах плавиковой и фосфорной кислотах. Не взаимодействуют с растворами щелочей даже при нагревании. Амфотерными свойствами не обладают [5].

Во влажном воздухе тускнеют, покрываясь пленками оксидов. Сродство к кислороду понижается с ростом порядкового номера, поэтому элементы иттриевой подгруппы значительно устойчивее на воздухе, чем цериевой [6].

При нагревании в атмосфере кислорода РЗЭ воспламеняются и сгорают ярким пламенем до Me_2O_3 . С галогенами взаимодействуют при сравнительно невысокой температуре: интенсивность реагирования уменьшается от фтора (F) к йоду (J). Непосредственно реагируют с серой (S), теллуром (Te), селеном (Se), фосфором (P), углеродом (C), азотом (N), с водородом (H) образуют гидриды переменного состава от LnH_3 до LnH_2 . РЗЭ – хорошие восстановители, восстанавливают многие оксиды до металлов. Со многими из них они образуют сплавы и интерметаллические соединения. Сплавы церия с другими РЗЭ в порошкообразном состоянии пирофорны [6].

РЗЭ (в виде соединений, сплавов и металлов) находят применение в различных областях техники: в черной и цветной металлургии, в керамической и стекольной промышленности, электротехнике и электронике, светотехнике, атомной, нефтехимической, авиакосмической и многих других областях [7].

1.1.2 Обзор мирового и российского рынка редкоземельных металлов

РЗЭ относятся к видам минерального сырья, имеющим стратегическое значение для всех развитых стран мирового сообщества [3]. С каждым годом рынок РЗЭ растет глобальными темпами.

Основными потребителями РЗЭ в настоящее время являются страны – лидеры мировой экономики: Китай (54 %), Япония и Южная Корея (24 %), страны Европы (Германия и Франция, 13 %), США (8 %).

Слабо предсказуемое поведение Китая на данном этапе, привело к тому, что зарубежный рынок достаточно насыщен продукцией РЗЭ, настолько, что предложение превышает спрос. По прогнозам аналитиков мировой спрос на РЗМ к 2020 году увеличится в (1,5–2) раза, и будет составлять (185–200) тыс. тонн в год. Вероятно, предложение по-прежнему будет превышать спрос, но это будет наблюдаться за счет избытка легких РЗЭ таких как, La, Ce, Pr и др. Что касается средних и тяжелых РЗЭ, то они, как и ранее останутся в дефиците для многих промышленно развивающихся стран [3].

До недавнего времени 97 % РЗЭ производилось в Китае, при этом он контролировал до 42 % мировых запасов [3]. Основная часть запасов находится в районе Баян-Обо (Монголия) [8].

В течении (10–15) лет Китай поставлял РЗЭ на мировой рынок по демпинговым ценам, благодаря использованию собственной сырьевой базы, а также при отсутствии жестких требований и низких затрат. Такой подход привел к тому, что цены на РЗЭ упали в (2–4) и более раз. Как следствие, производства по РЗЭ находящиеся за пределами Китая подверглись закрытию

из-за нерентабельности. После тактической победы на глобальном рынке, в Китае была локализована полная технологическая цепочка производства РЗЭ и тем самым обеспечен доступ к рынкам конечной продукции с высокой стоимостью. Конечная продукция поставляется для собственных нужд, а также на экспорт, в промышленно развитые страны, такие как, Япония, США, Германия, Франция и другие. Такая стратегия является наиболее подходящей для развития китайской экономики, где все острее проявляются экологические, ресурсные и транспортные ограничения. Данная стратегия (создание полного цикла) получила название «от месторождения к магнитам» [3].

Уровень цен на РЗЭ до середины 2011 года диктовались экспортными квотами Китая, который в 2010 году начал резко сокращать объем их поставок и заявил о возможном прекращении экспорта оксидов РЗЭ средней и тяжелой группы к (2015–2016) годам. Такая политика связана с исчерпанием сырьевой базы и с ростом внутреннего потребления. Именно поэтому в 2011 году произошел резкий скачек цен на рынке РЗЭ вне Китая. Благодаря экстренному принятию мер странами–потребителями РЗЭ (Япония, США, страны ЕС, Южная Корея), которые сделали ставку на развитии научно-технологической базы и на поддержку кампаний с диверсифицированными источниками сырья, цены на РЗЭ начали постепенно снижаться. По прогнозам к 2020 году доля Китая на мировом рынке должна будет снизиться вдвое, в результате развития предприятий в других странах. Лидерами могут стать компании США и Австралии. Также не исключается возможность вхождения РФ в тройку лидеров среди не китайских производителей [9]. Очевидно, что цена на индивидуальные РЗЭ после скачка в 2011 году и затем некоторого снижения, будет стабилизироваться, это связано несколько с ослаблением позиций Китая на мировом рынке, сколько с устойчивым ростом потребления РЗЭ. Рост спроса на РЗЭ с каждым годом только увеличивается, что заставляет задуматься о разработки новых месторождений и новых научных проектах по переработки сырья содержащего РЗЭ.

В России месторождения минералов РЗЭ являются комплексными со сравнительно низким содержанием РЗЭ. Среднее содержание суммы триоксидов РЗЭ в российских месторождениях редко превышает 1 %, в то время как среднее содержание суммы триоксидов РЗЭ в рудах китайских месторождений составляет 5 %. Именно поэтому Россия занимает второе место по запасам РЗЭ [8].

Существуют некоторые проблемы, из-за которых страна не в состоянии удовлетворить спрос даже на собственные нужды. Данные проблемы приводят к сырьевой зависимости от зарубежных стран, в первую очередь от Китая. В результате перестройки и распада СССР, советская редкоземельная промышленность была разрушена. Вследствие чего, в России сократилось потребление РЗЭ в 10 раз. Вторая проблема заключается в том, что в стране отсутствуют предприятия по переработке сырья содержащего РЗЭ и производящие индивидуальные РЗЭ, а также оксиды РЗЭ.

На территории страны расположено уникальное месторождение – Тамторское, в рудах которого содержание РЗЭ в среднем приходится в пределах от 7,98 % до 12,8 %. Месторождение располагается на северо-западе Республики Саха (Якутия). В Мурманской области находятся Левозерское, Юкспорское и Коашвинское месторождения, в которых сконцентрированы колоссальные запасы РЗЭ, около 3,9 млн. тонн в пересчете на сумму триоксидов этих металлов. Также существуют крупные месторождения РЗЭ в Республике Коми, Тыва, Иркутской и Читинской областях, а также в Красноярском крае [10].

Для развития высокотехнологических производств и избавления от импортной зависимости, необходимо принятие эффективных мер на государственном уровне по возрождению добычи и производства РЗЭ.

1.2 Аналитический обзор рассматриваемого процесса

1.2.1 Типы руд и минералы редкоземельных металлов

Содержание РЗЭ в земной коре достаточно велико. Суммарный кларк лантаноидов составляет $(1,6 \cdot 10^{-2} - 1,7 \cdot 10^{-2}) \%$. Кларк лантаноидов с четными атомными номерами больше, чем у лантаноидов с нечетными атомными номерами. Наиболее распространены в земной коре представители легких РЗЭ: La ($1,8 \cdot 10^{-3} \%$), Ce ($4,5 \cdot 10^{-3} \%$) и Nd ($2,5 \cdot 10^{-3} \%$). Наименее распространены: Eu ($1,2 \cdot 10^{-4} \%$), Tb ($1,5 \cdot 10^{-4} \%$), Ho ($1,3 \cdot 10^{-4} \%$), Lu ($1,0 \cdot 10^{-4} \%$) и Tm ($8,0 \cdot 10^{-5} \%$) [11].

В настоящее время известно более 250 минералов содержащих РЗЭ, но к собственным минералам, содержащих более (5–8) % относится около (60–65) минералов. В природе минералы представлены главным образом в виде фосфатов, фторидов, фторо-карбонатов, силикатов, силикотитанатов, ниоботанталатов, титанониобатов. Во многих минералах РЗЭ содержится уран, торий и продукты их полураспада. В одних минералах могут преобладать элементы цериевой группы, в других элементы иттриевой группы. Поэтому минералы разделяются на комплексные, содержащие все РЗЭ в различных соотношениях и селективные, где представлены либо элементы цериевой группы, либо элементы иттриевой группы. К комплексным минералам относятся: гадолинит, ортит и др. К селективным минералам цериевой группы относятся: монацит, бастнезит, лопарит, эшипит, паризит и др. К минералам иттриевой группы относится: самарксит, эвксенит, ксенотим, фергусонит, приорит и др. [6]. В подавляющей части минералы РЗЭ являются комплексными. Многие комплексные минералы перерабатывают с целью получения каких либо других элементов, РЗЭ извлекаются попутно. Наибольшее промышленное значение представляют минералы: монацит, бастнезит и ксенотим. Монацит и бастнезит содержат преимущественно легкие лантаноиды, ксенотим тяжелые. Минерал монацит представляет собой безводную смесь ортофосфатов РЗЭ, тория, урана. Окраска минерала довольна

разнообразна, бывает желтой, светло-серой красновато-бурой, темно-зеленой, черной. Монацит содержит от 50 % до 69 % оксидов РЗЭ, от 4 % до 12 % оксида тория (ThO_2) и от 0,1 % до 0,4 % оксида урана (U_3O_8). Плотность монацита колеблется в пределах $(4,9\text{--}5,5) \text{ г/см}^3$, твердость равна 5,5 по шкале Мооса. Добыча монацита осуществляется в Бразилии, Малайзии, Индии и Австралии в основном из россыпей. Бастнезит представляет собой фтор-карбонат церия, лантана и празеодима. Является главным сырьевым источником при получении церия. Окраска бывает: красная, бурая, желтая. Общее содержание оксидов РЗЭ лежит в пределах от 73 % до 76 %. Пределы плотности $(4,8\text{--}5,2) \text{ г/см}^3$, твердость 4,5 по шкале Мооса. Минерал характерен для гидротермальных месторождений. Добыча бастнезита производится на территории Кольского полуострова, на Южном Урале и в Красноярском крае. Месторождения имеются в Швеции, США, КНР и Бурунди. Ксенотим – минерал класса фосфатов. Содержит (52–67) % оксидов РЗЭ преимущественно иттриевой группы и по 3 % оксида тория (ThO_2) и оксида урана (U_3O_8). Цвет может быть белым, желтым, желтовато-бурым, коричневым. Пределы плотности $(4,4\text{--}4,6) \text{ г/см}^3$, твердость 4,5 по шкале Мооса. Добывается в основном из россыпных месторождений, находящихся в Норвегии, Малайзии, Швеции, Бразилии [12].

Основные типы месторождений РЗЭ: 1) монацитовые россыпи; 2) гидротермальные месторождения; 3) урано-редкоземельные гранитные пегматиты; 4) ксенотимовые россыпи; 5) бастнезит-паризитовые гидротермальные месторождения; 6) полиметаллические месторождения с монацитом [12].

1.2.2 Краткий обзор существующих методов производства и оборудования

Из разнообразных методов вскрытия монацитового концентрата на практике нашли применение высокотемпературная сульфатизация с

использованием серной кислоты и щелочное вскрытие с использованием гидроксида натрия [13].

Известен способ вскрытия монацитового концентрата, включающий разложение концентрата 96 % серной кислотой при ее расходе (250–300) % от стехиометрии и температуре (200–240) °С в течение (2–4) часов, обработку сульфатного спека охлажденной водой при отношении Т:Ж=1:9–20 с переводом в раствор сульфатов РЗЭ, фильтрацию раствора с отделением нерастворимых примесей и выделения РЗЭ щавелевой кислотой при температуре 80 °С и рН=1,5 в виде оксалатного осадка и их перевод в гидроксиды обработкой щелочью [14].

Недостатками способа являются: большой избыток реагента вскрытия, большой объем сбросных вод ~40 м³/т концентрата, периодичность процесса непосредственно вскрытия, высокая агрессивность процесса вскрытия монацита концентрированной серной кислотой при большом ее избытке против стехиометрии и высокой температуре.

Явным недостатком такого способа является то, что при нейтрализации сернокислотных растворов гидроксидом натрия накапливается большое количество малоликвидного продукта – сульфата натрия

Также, извлечение фосфора из сернокислотных растворов осуществляется с использованием экстракции, что приводит к удорожанию его стоимости и в целом усложняет процесс переработки монацита.

Известен промышленный способ вскрытия монацитового концентрата путем разложения концентрата 45 % раствором едкого натра в течение 3 часов при его расходе 300 % от стехиометрии и температуре 140 °С отделением осадков гидроксидов РЗЭ [14].

Недостатками данного щелочного способа вскрытия монацитового концентрата являются: длительность периодического процесса – 3 часа, низкая фильтруемость осадков гидроксидов, необходимость тонкого измельчения монацитового концентрата (98 % до – 360 меш), высокий расход щелочи, неполнота разложения концентрата, высокая агрессивность растворов.

При нейтрализации солянокислых растворов гидроксидом натрия накапливается большое количество малоликвидного продукта – хлорида натрия.

Основным преимуществом щелочного метода перед методом разложения монацита серной кислотой заключается в отделении уже на первой стадии фосфора от тория и РЗЭ с получением полезного побочного продукта – фосфата натрия.

Для разделения смеси РЗЭ и РЭ на индивидуальные компоненты в современной химической технологии используют процессы ионного обмена и экстракции. Однако у современных методов существуют свои недостатки. Так, в случае жидкостной экстракции необходимо учитывать взаимную растворимость водной и органической фаз, приводящую к безвозвратной потере экстрагента, стоимость которого сопоставима с разделяемыми РЗЭ и РЭ. Процессу ионного обмена присущи низкие коэффициенты разделения РЗЭ, вследствие чего его можно рассматривать лишь как дополнительный к экстракции способ разделения РЗЭ и РЭ. Поэтому поиск методов разделения РЗЭ и РЭ до сих пор является актуальной задачей [13].

1.3 Аналитический обзор процесса выщелачивания и растворения

1.3.1 Теория процессов

Первой и важнейшей операцией многих гидрометаллургических технологических схем является выщелачивание.

Выщелачивание – избирательное извлечение одного или нескольких компонентов из твердого вещества (рудного концентрата) водой или раствором химических реагентов. Избирательность извлечения достигается подбором соответствующего растворителя и созданием условий (концентрация реагентов, температура и другие), при которых растворимость и скорость растворения компонентов твердого вещества отличаются [15].

Растворение – неселективный процесс, это перевод всей массы твердого вещества, содержащего соединения металлов, в раствор под действием воды или химических реагентов. Растворение применяют для переработки богатых рудных или химических концентратов, содержащих незначительное количество примесей, которые вместе с целевыми компонентами также переходят в раствор. Получаемый при растворении продукт поступает на дальнейшую гидрометаллургическую переработку.

Физико-химическая сущность процессов выщелачивания и растворения одинакова, различия этих процессов обусловлены лишь особенностями строения и составом твердого вещества [16].

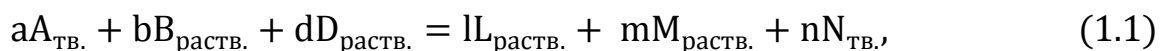
Твердое вещество, поступающее на выщелачивание, состоит из минералов металлов – ценных (целевых) компонентов и пустой породы. В процессе выщелачивания растворяют только ценные компоненты, стараясь не затрагивать, пустую породу, которая остается в твердом остатке.

Химическое выщелачивание, в свою очередь, может быть кучным (из бедных отвальных штабелированных шлаков), подземным (проводимым непосредственно в недрах с последующей переработкой продуктивных растворов) и, так называемым, «чановым», то есть проводимым в специальной заводской аппаратуре (агитаторы и перколяторы, пульсационные колонны, пачуки, автоклавы). В зависимости от реагента выщелачивание руд и концентратов редких элементов подразделяется на 2 типа: кислотное или щелочное. С целью интенсификации выщелачивания иногда проводят одновременно с ионным обменом [15].

Удельный расход (расходные коэффициенты) реагентов – один из основных технико-экономических показателей технологического процесса. Если переходящие в раствор соединения металлов образуются в результате химической реакции, протекающей при выщелачивании, возможность осуществления процесса, степень его протекания при заданном расходе параметров и минимальный их расход, необходимый для полного извлечения

металла в раствор, связаны с величиной концентрационной (кажущейся) константы равновесия реакции K_c .

В общем виде реакцию выщелачивания можно описать уравнением:



где: A – соединение выщелачиваемого металла в исходном материале;

B – основной реагент;

D – компонент раствора, принимающий участие в реакции выщелачивания;

L – основной продукт реакции, соединение выщелачиваемого металла, переходящее в раствор;

M и N – образующиеся при выщелачивании растворимое и твердое вещества.

Если твердые вещества присутствуют в виде самостоятельных фаз, выражение концентрационной константы равновесия имеет вид:

$$K_c = [L]^l \cdot [M]^m / [B]^b \cdot [D]^d, \quad (1.2)$$

где: [I] – равновесные концентрации, моль/л;

B и D равновесные концентрации, соответствуют непрореагировавшим количествам этих веществ.

Константы равновесия реакций выщелачивания, как и любых других реакций, можно определить экспериментально.

Константа равновесия K_p следующей реакции



равна:

$$K_p = \frac{a_D^d \cdot a_G^g}{a_A^a \cdot a_B^b} = \frac{[D]^d \cdot [G]^g}{[A]^a \cdot [B]^b} \cdot \frac{\gamma_D^d \cdot \gamma_G^g}{\gamma_A^a \cdot \gamma_B^b}, \quad (1.4)$$

где: a_i – активность компонента после установления равновесия;

[I] – концентрация компонента после установления равновесия;

γ_i – коэффициент активности компонента после установления равновесия.

Первый сомножитель уравнения представляет собой концентрационную константу равновесия K_c :

$$K_c = \frac{[D]^d \cdot [G]^g}{[A]^a \cdot [B]^b}. \quad (1.5)$$

Для экспериментального определения константы равновесия нужно взять некоторое количество исходных веществ и затем, поддерживая систему при постоянной температуре, фиксировать изменение во времени концентраций исходных и конечных веществ, вплоть до установления равновесия. Часто к равновесию подходят и с обратной стороны, взяв в начале опыта не исходные вещества, а конечные продукты реакции. В том и в другом случае равновесие достигается при соотношении концентраций:

$$[D]^d \cdot [G]^g / [A]^a \cdot [B]^b. \quad (1.6)$$

равном K_c .

Поскольку концентрационная и термодинамическая константы равновесия обычно имеют близкие значения, для предварительной оценки расхода реагентов вместо K_c можно использовать K_p . Значение последней можно найти расчетным путем по известным величинам термодинамических функций веществ, участвующих в реакции: изменения энергии Гиббса ΔG^0 , энтальпии ΔH^0 и энтропии ΔS^0 [17].

1.3.2 Термодинамика процесса выщелачивания

Для того чтобы определить вероятность протекания процесса выщелачивания, в первую очередь необходимо провести термодинамические расчеты.

Как известно из химической термодинамики, связь между константой равновесия и изменением энергии Гиббса при температуре (T) выражается соотношением:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_p, \quad (1.7)$$

где: R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Изменение энергии Гиббса связано с изменением энтальпии и энтропии уравнением Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0. \quad (1.8)$$

Значение ΔG_T^0 можно рассчитать, если известны стандартные величины ΔH_{298}^0 , ΔS_{298}^0 и зависимость теплоемкостей от температуры. Так как:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT, \quad (1.9)$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT, \quad (1.10)$$

то,

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT. \quad (1.11)$$

При расчетах гидрометаллургических процессов, протекающих при температурах, относительно мало отличающихся от стандартной, в большинстве случаев поправку на отклонение ΔH_T^0 и ΔS_T^0 от стандартных значений можно не учитывать и проводить расчеты по приближенному уравнению:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0, \quad (1.12)$$

$$\Delta H_{298}^0 = \Sigma \Delta H_{\text{прод}}^0 - \Sigma \Delta H_{\text{исх}}^0, \quad (1.13)$$

$$\Delta S_{298}^0 = \Sigma \Delta S_{\text{прод}}^0 - \Sigma \Delta S_{\text{исх}}^0. \quad (1.14)$$

Реакция практически необратима в том случае, если в результате расчета наблюдается большое отрицательное значение ΔG^0 (40 кДж и более), это означает, что константа равновесия реакции очень велика. Реакция практически не идет в том случае если наблюдается большое положительное значение ΔG^0 (более 40 кДж/моль), так как K_p очень мала. Если в результате получается относительно небольшое положительное значение ΔG^0 , то не следует делать вывод о невозможности протекания реакции. О направлении протекания

реакции при определенном сочетании концентраций исходных веществ и продуктов необходимо также судить по изменению энергии Гиббса, рассчитываемому по уравнению изотермы Вант-Гоффа:

$$\Delta G_T = -RT \ln K_p + RT \ln q, \quad (1.15)$$

$$\Delta G_T = \Delta G_T^0 + RT \ln q. \quad (1.16)$$

Здесь q по форме совпадает с выражением K_p , но в q входят не равновесные, а начальные или текущие (до достижения равновесия) активности исходных веществ и продуктов реакции.

Активности исходных веществ и продуктов реакции в стандартных условиях равны единице, следовательно, $q = 1$. В этом случае $\Delta G_T = \Delta G_T^0 = -RT \ln K_p$. Изменение энергии Гиббса будет отрицательным, при $K_p > q$, и реакция будет протекать в прямом направлении до установления равновесия (до $\Delta G_T = 0$, $q = K_p$). Реакция может протекать только в обратном направлении, при $K_p < q$ [17].

Термодинамические константы веществ, которые участвуют в процессе водного выщелачивания РЗЭ, Fe, Th и U представлены в таблице А.1. приложения А [18,19].

Проводим термодинамический расчет химических реакций протекающих в технологической системе, при температуре 298 К. Для расчета используются формулы:

$$\Delta H_{298}^0 = \sum \Delta H_{(\text{прод})}^0 - \sum \Delta H_{298 (\text{исх})}^0, \quad (1.17)$$

$$\Delta S_{298}^0 = \sum \Delta S_{(\text{прод})}^0 - \sum \Delta S_{298 (\text{исх})}^0, \quad (1.18)$$

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0, \quad (1.19)$$

Результаты термодинамического расчёта химических реакций при 298 К, протекающих в системе, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Энергии Гиббса, константы равновесия и тепловые эффекты реакций выщелачивания при 298 К

$\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	
ΔH^0 , кДж/моль	–219,932
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	–30,124
ΔG^0 , кДж/моль	–210,992
$\text{ThCl}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Th}(\text{OH})_4 \downarrow + 4\text{HCl}$	
ΔH^0 , кДж/моль	105,636
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	–718,144
ΔG^0 , кДж/моль	319,643
$\text{UCl}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{U}(\text{OH})_4 \downarrow + 4\text{HCl}$	
ΔH^0 , кДж/моль	126,975
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	–714,537
ΔG^0 , кДж/моль	339,907
$\text{ThCl}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ThOCl}_2 + 2\text{HCl}$	
ΔH^0 , кДж/моль	–25,652
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	501,116
ΔG^0 , кДж/моль	–174,985
$\text{UCl}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{UOCl}_2 + 2\text{HCl}$	
ΔH^0 , кДж/моль	–45,735
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	518,855
ΔG^0 , кДж/моль	–200,354
$\text{LnCl}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ln}(\text{Cl})_{3(p-p)} \downarrow + \text{H}_2\text{O}$	
ΔH^0 , кДж/моль	–186,499
ΔS^0 , Дж/(моль · К)	–201,762
ΔG^0 , кДж/моль	–133,645

1.3.3 Кинетика процесса выщелачивания

Для полной характеристики процесса выщелачивания термодинамических данных недостаточно, и требуются сведения о кинетике и механизме взаимодействий в системе минерал – растворитель [16].

Кинетика и механизм процесса выщелачивания, а также процесса растворения определяется структурой и составом растворяемого минерала, а также целым рядом физико-химических свойств растворителя. Растворение минералов состоит из стадий подвода частиц растворителя к поверхности минерала, собственно взаимодействия растворителя и минерала и отвода продуктов реакции от поверхности раздела фаз.

Скорости растворения и выщелачивания твердых веществ определяются не скоростью химических реакций, которые происходят на границе твердой и жидкой фаз, а скоростью диффузионных процессов. Т.к. константа скорости химического взаимодействия минерала с реагентом значительно больше, чем константа скорости диффузии. Скорость процесса определяется скоростью самой медленной реакции. Различают внешнюю и внутреннюю диффузию. Если константа скорости велика, химическое сопротивление мало, то скорость выщелачивания лимитируется внешней и внутренней диффузией.

В диффузионном слое, непосредственно у растворяемого минерала, концентрация растворенного вещества приближается к концентрации насыщенного раствора $C_{\text{нас}}$ и может быть приравнена к ней. Если в толще выщелачивающего раствора концентрация растворенного вещества будет C , то скорость диффузии этого вещества будет тем больше, чем больше разница в концентрациях ($C_{\text{нас}} - C$). Внутренняя диффузия наблюдается при прохождении растворяемого вещества и растворителя через образующуюся в ходе процесса тонкую пленку твердого продукта или при выщелачивании вещества из пор минерала.

Скорость физического растворения уменьшается по логарифмическому закону при повышении концентрации растворенного вещества C в жидкой фазе и выражается кинетическим уравнением для режима неполного смешения:

$$dC/dt = kS(C_{\text{нас}} - C), \quad (1.20)$$

где: dC/dt – скорость изменения концентрации растворенного вещества в объеме раствора;

S – площадь растворимой поверхности;

k – константа скорости растворения, зависящая от скоростей диффузии и разрушения кристаллической решетки;

k прямо пропорциональна коэффициенту диффузии D растворяемого вещества и обратно пропорциональна толщине диффузионного слоя δ :

$$k = D/\delta. \quad (1.21)$$

Константа скорости реакции является постоянной величиной, не зависящая от концентрации. k также зависит от физических и химических свойств реагирующих веществ, скоростей потоков реагирующих масс, конструкции аппарата.

Движущей силой процесса называется разность $C_{\text{нас}} - C = \Delta C$, что вытекает из очевидного предположения о том, что число столкновений зависит от концентрации этих частиц. В соответствии с основным законом химической кинетики скорость реакции в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ. В гетерогенных процессах массопередачи в системе твердое – жидкость изменение концентрации компонентов различно. Поэтому различны и формулы, определяющие движущую силу процесса.

Подставив выражение для k , уравнение можно представить в виде:

$$dC/dt = DS(C_{\text{нас}} - C)/\delta. \quad (1.22)$$

Таким образом, скорость физического растворения пропорциональна коэффициенту диффузии растворяемого вещества, поверхности минерала и

разности концентраций растворенного вещества у этой поверхности и в толще выщелачивающего раствора.

Скорость растворения имеет наибольшую величину в самом начале процесса и становится равной нулю при $C_{\text{нас}} = C$, т. е. в насыщенном растворе. При прочих равных условиях скорость растворения пропорциональна поверхности частиц минерала S и обратно пропорциональна толщине диффузионного слоя δ , которая в значительной мере зависит от физических условий растворения, в частности, от условий перемешивания пульпы.

Кинетика химического растворения и выщелачивания зависит от связанных между собой и протекающих одновременно физико-химических и химических процессов на поверхности твердого тела и диффузионных процессов доставки компонентов раствора к поверхности растворяемых частиц и продуктов реакций в толщу раствора. Для переходной области при определенных условиях.

$$k = (k_1 D / \delta) / (k_1 + D / \delta) = k_1 D / (k_1 \delta + D), \quad (1.23)$$

где: k_1 – константа скорости химических процессов на поверхности раздела фаз, изменяющаяся с повышением температуры в соответствии с уравнением Аррениуса.

Имеется целый ряд доказательств, подтверждающих, что именно скорость диффузии лимитирует скорость многих процессов растворения и выщелачивания.

При протекании процесса во внешедиффузионной области его скорость линейно зависит от концентрации реагента, скорости потока и мало зависит от температуры, так как коэффициенты диффузии при повышении температуры раствора увеличиваются медленно. Поэтому энергия активации процесса невелика 8–17 кДж/моль. Кроме того, диффузионное сопротивление не зависит от времени.

При протекании процесса во внутريدиффузионной области: скорость процесса не зависит от скорости потока жидкости относительно растворяемого тела, но существенно зависит от его пористости; диффузионное сопротивление

растет со временем, так как растет толщина слоя твердого продукта реакции и увеличивается путь диффузии. Также, скорость процесса мало зависит от температуры. Энергия активации составляет 8–21 кДж/моль.

Скорости большинства химических реакций: растворение, разложение, выщелачивание, с ростом температуры увеличиваются, так как при этом большее число частиц будет обладать достаточным запасом энергии для разрыва или ослабления химических связей в исходных веществах. Энергия активации большинства реакций равняется 20–85 кДж/моль.

Влияние температуры на скорость реакции выражается уравнением Аррениуса:

$$\ln k = A/T + B, \quad (1.24)$$

где: k – константа скорости реакции;

A и B – индивидуальные постоянные, характерные для данной реакции.

При повышении температуры на 1 °C скорость реакции возрастает приблизительно на 10 %, а скорость диффузии возрастает на 2 % [16].

Скорость выщелачивания зависит:

- концентрация выщелачивающего реагента. Для того, чтобы в конце процесса скорость не уменьшалась до нуля необходим избыток реагента над стехиометрическим количеством;

- температура. Увеличение температуры на 10 °C, увеличивается скорость реакции в (1,5–2) раза;

- степень измельчения. При увеличении степени измельчения скорость выщелачивания возрастает;

- перемешивание. Толщина внешнего диффузионного слоя обратно пропорционально квадратному корню из скорости перемешивания;

- соотношение твердой и жидкой фазы. При увеличении твердой фазы увеличивается вязкость, следовательно, ухудшаются условия перемешивания [15].

2 Объект и методы исследования

Цель дипломного проекта: проектирование цеха разделения РЗЭ и РЭ, производительностью 100 тонн в год по оксидам РЗЭ.

Объектом исследования является аппарат, в котором осуществляется водное выщелачивание хлоридов РЗЭ и РЭ.

Предметом исследования является цех, в котором будет осуществляться процесс водного выщелачивания хлоридов РЗЭ и РЭ.

В работе использована совокупность экспериментальных и теоретических методов исследований. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторном масштабе. Теоретические исследования заключались в аналитическом обзоре литературы и ознакомлении с уже проделанными работами в этой области для накопления достаточной теоретической базы, а также в термодинамическом расчете для оценки вероятности протекания исследуемого процесса.

Исходным сырьем для дальнейшей технологической переработки является монацитовый концентрат. Состав сырья: $[\Sigma \text{РЗЭРО}_4] = 90,63 \%$; $[\text{Th}_3(\text{PO}_4)_4] = 7,10 \%$; $[\text{U}_3(\text{PO}_4)_4] = 1,24 \%$; $[\text{FeTiO}_3] = 1,03 \%$. При стадии щелочного выщелачивания степень вскрытия концентрата – 99,5 %; ильменита – 0,3 %. Расход гидроксида натрия, с содержанием 450 г/л, 150 % от стехиометрического. Степень хлорирования полученных гидроксидов в результате щелочного вскрытия, для $[\Sigma \text{РЗЭ}(\text{OH})_3] = 99 \%$, $[\text{Th}(\text{OH})_4] = 70 \%$, $[\text{U}(\text{OH})_4] = 100 \%$, $[\text{Fe}(\text{OH})_2] = 100 \%$. Степень водного выщелачивания хлоридов, после хлорирования: РЗЭ – 95 %; Th – 0,01 %; U – 0,05 %; Fe – 0,10 %. Полученные данные использовались в качестве исходных для проведения необходимых расчетов и последующего конструирования. Основным аппаратом цеха является аппарат с механическим перемешивающим устройством.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью экономического расчета является определение себестоимости продукции, обоснование финансово-экономической целесообразности проекта и выявление условий, при достижении которых создание предприятия является экономически оправданным [38].

5.1 Расчет численности рабочих

Проектируемый цех будет работать в непрерывном режиме без выходных и праздничных дней, с остановками для выполнения ТР и ППР производимых согласно действующего утвержденного графика один раз в месяц в течение двух дней.

Проектируемый цех работает круглосуточно в три смены (дневная, вечерняя и ночная). Рабочие будут меняться согласно графику сменности. Всего на работника, работающего в цеху будет приходиться: 88 дневных, 89 вечерних и 88 ночных смен в году. Длительность отдыха рабочего в году составляет 100 дней

Продолжительность смен:

- дневная смена: с 7 часов 10 минут до 16 часов 30 минут, с техническим перерывом 1 час;
- вечерняя смена: с 16 часов 30 минут до 00 часов 00 минут, с техническим перерывом 30 минут;
- ночная смена: с 00 часов 00 минут до 7 часов 10 минут, с техническим перерывом 30 минут.

Составим перечень должностных обязанностей в проектируемом цеху и их характеристики (таблица 5.1), а также баланс рабочего времени среднесуточного рабочего, с целью определения фонда рабочего времени (таблица 5.2) [39].

Таблица 5.1 – Перечень должностных обязанностей и их характеристики

Должность	Количество работников	Образование	Стаж работы	Функциональные обязанности	Разряд	Возраст
Руководители						
Начальник цеха	1	Высшее (техническое)	Не менее 15 лет	Контроль и управление работниками цеха	–	От 38 лет
Заместитель начальника цеха	1	Высшее (техническое)	Не менее 12 лет	Подготовка технической документации, ведение отчетности и т.д.	–	От 35 лет
Старший инженер-технолог	1	Высшее (техническое)	Не менее 10 лет	Контроль и управление работниками цеха, консультирование инженерного состава	–	От 33 лет

Продолжение таблицы 5.1

Начальник смены	4	Высшее (техническое)	Не менее 7 лет	Наблюдение за непрерывностью работы в цехе, решение технологических задач, принятие экстренных мер в случае аварийных ситуаций, безопасность подчиненного рабочего персонала	Инженер-технолог первой категории	Не менее 30 лет
Специалисты						
Инженер-технолог	4	Высшее (техническое)	Без стажа	Решение технологических задач, принятие экстренных мер в случае аварийных ситуаций	Инженер-технолог первой, второй категории	—

Продолжение таблицы 5.1

Основные рабочие						
Аппаратчик	4	Высшее (техническое)	Без стажа	Определяет направление потока пульпы, следит за показателями приборов, принятие экстренных мер в случае аварийных ситуаций	Аппаратчик 5 разряда	—
Вспомогательные рабочие						
Дозиметрист	4	Высшее (техническое)	Без стажа	Контроль радиационной обстановки в цехе	—	—
Механик	2	Высшее (техническое)	Без стажа	Монтажные, демонтажные, ремонтные, пусконаладочные работы	—	—
Электрик	4	Высшее (техническое)	Без стажа	Наблюдение за штатной работой и усиленный ремонт электрооборудования	—	—

Продолжение таблицы 5.1

КИПиА	4	Высшее (техни- ческое)	Без стажа	Наладка и мониторинг работы приборов контроля и управления	—	—
Младший обслуживающий персонал						
Уборщик	4	Среднее, среднее специа- льное	Без стажа	Влажная уборка рабочих помеще- ний, дезактивация	—	—

Таблица 5.2 – Баланс эффективного рабочего времени среднесписочного рабочего

Элемент времени	Дни	Часы
Календарное число дней	365	8760
Выходные дни	59	1416
Праздничные дни	—	—
Номинальный фонд рабочего времени	365	Дневная смена – 704 Вечерняя смена – 623 Ночная смена – 616
Планируемые выходные:		
– очередные и дополнительные отпуска;	36	864
– отпуска за вредность;	5	120
Итого	41	984
Эффективный фонд рабочего времени	265	6360

Численность производственных рабочих определяется, исходя из прогрессивных норм обслуживания при полном обеспечении технологическим

персоналом всех рабочих мест. Число рабочих мест определяется, исходя из необходимых точек наблюдения и операций по обслуживанию процесса, а также объема работы управления цехом.

Один аппаратчик способен обслуживать 18 аппаратов в смену. Определим явочную численность основных рабочих в сутки по формуле (5.1):

$$N_{\text{яв.}} = \frac{1}{N_{\text{обсл.}}} \cdot F \cdot C = \frac{1}{18} \cdot 18 \cdot 3 = 3 \text{ чел.} \quad (5.1)$$

где: $N_{\text{яв.}}$ – явочная численность рабочих в сутки, чел.;

$N_{\text{обсл.}}$ – количество аппаратов, которое может обслуживать один аппаратчик;

F – количество установок;

C – количество смен в сутки.

Небольшое количество технологического персонала (основных производственных рабочих) цеха обусловлено особенностями работы, которая заключается в основном в наблюдении за ходом процесса, это связано с высоким уровнем автоматизации оборудования цеха.

Определим списочную численность основных рабочих по формуле (5.2):

$$N_{\text{сп.}} = N_{\text{яв.}} \cdot \frac{T_{\text{эф.обор.}}}{T_{\text{эф.раб}}} = 3 \cdot \frac{341}{265} = 3,9 \text{ чел.} \quad (5.2)$$

где: $N_{\text{сп.}}$ – списочная численность основных рабочих, чел.;

$T_{\text{эф.обор.}}$ – проектируемое число дней работы оборудования в год (без учета времени на ТР и ППР);

$T_{\text{эф.раб}}$ – проектируемое число дней работы одного рабочего в год.

Принимаем 4 человека в штат основных рабочих данного цеха.

Специфика работы цеха, а именно наличие опасных и вредных факторов, предполагает обязательное присутствие в рабочую смену руководителя (начальника смены) – 1 и специалиста (инженера-технолога) – 1.

$$N_{\text{яв.}} = 1 \cdot 3 = 3 \text{ чел.}; \quad (5.3)$$

$$N_{\text{сп.}} = 3 \cdot \frac{341}{265} = 3,9 \text{ чел.} \quad (5.4)$$

Принимаем, что в штате руководствующего состава данного цеха, начальников смены должно быть 4 человека, по одному в каждую рабочую смену.

$$H_{\text{яв.}} = 1 \cdot 3 = 3 \text{ чел.}; \quad (5.5)$$

$$H_{\text{сп.}} = 3 \cdot \frac{341}{265} = 3,9 \text{ чел.} \quad (5.6)$$

Принимаем 4 человека в штат специалистов данного цеха

Комплектуем цех вспомогательным персоналом, который будет заниматься обслуживанием данного цеха в рабочую смену в составе: дежурный дозиметрист – 1, дежурный электрик – 1, дежурный КИПиА – 1.

Для начала определим явочную и списочную численность вспомогательных рабочих отдельно по их должностям в сутки (формулы 5.7, 5.8)

$$H_{\text{яв.}} = 1 \cdot 3 = 3 \text{ чел.}; \quad (5.7)$$

$$H_{\text{сп.}} = 3 \cdot \frac{341}{265} = 3,9 \text{ чел.} \quad (5.8)$$

Теперь определим суммарную явочную и списочную численность вспомогательных рабочих по формулам (5.9, 5.10)

$$\Sigma H_{\text{яв.}} = 3 + 3 + 3 = 9 \text{ чел.}; \quad (5.9)$$

$$\Sigma H_{\text{сп.}} = 3,9 + 3,9 + 3,9 = 11,7 \text{ чел.} \quad (5.10)$$

Отдельно посчитаем явочную и списочную численность механиков. Т.к. монтажные, демонтажные, ремонтные и пусконаладочные работы проводятся исключительно в дневное время. Смена механиков длится 10 часов в сутки. График сменности выглядит следующим образом: 3 дня рабочих через 3 дня выходных. График работы: с 7 часов 10 минут до 18 часов 30 минут, с техническим перерывом 1 час. Расчет ведется по формулам (5.11, 5.12).

$$H_{\text{яв.}} = 1 \cdot 1 = 1 \text{ чел.}; \quad (5.11)$$

$$H_{\text{сп.}} = 1 \cdot \frac{341}{265} = 1,3 \text{ чел.} \quad (5.12)$$

Принимаем 14 человек в штат вспомогательных рабочих осуществляющих обслуживание данного цеха, из них: 4 дозиметриста, 4 электрика, 4 КИПиА, 2 механика.

Определим явочную и списочную численность младшего обслуживающего персонала отдельно по их должностям в сутки (формулы 5.13, 5.14)

$$N_{\text{яв.}} = 1 \cdot 3 = 3 \text{ чел.}; \quad (5.13)$$

$$N_{\text{сп.}} = 3 \cdot \frac{341}{265} = 3,9 \text{ чел.} \quad (5.14)$$

Принимаем 4 человека в штат младшего обслуживающего персонала.

5.2 Расчет годового фонда заработной платы руководителей, специалистов, основных и вспомогательных рабочих цеха, работающих в смену

Расчеты и данные годового фонда заработной платы вышеперечисленных рабочих представлены в приложении Б.

5.3 Расчет годового фонда заработной платы руководителей цеха

Результаты расчета годового фонда заработной платы руководителей цеха приведены приложения Г.

Полный годовой фонд заработной платы составляет:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{зп}} &= 3332481,55 + 3170906,70 + 3069922,40 + 2847756,97 \\ &\quad + 8543270,91 + 961572,73 + 2201457,51 + 1708094,08 \quad (5.15) \\ &= 25835462,80 \text{ руб.} \end{aligned}$$

5.4 Расчет капитальных затрат

Расчет капитальных затрат на здание ведется по формуле (5.16) [39]:

$$C_{зд.} = C + C_{от.} + C_{вент.} + C_{вод.} + C_{кан.} + C_{осв.}, \text{ руб.} \quad (5.16)$$

где: $C_{зд.}$ – капитальные затраты на здание, руб.;

C – стоимость помещения, руб.;

$C_{от.}$ – стоимость затрат на отопление, руб.;

$C_{вент.}$ – стоимость затрат на вентиляцию, руб.;

$C_{вод.}$ – стоимость затрат на водопровод, руб.;

$C_{кан.}$ – стоимость затрат на канализацию, руб.;

$C_{осв.}$ – стоимость затрат на освещение, руб.

$$C = C_{1м^3} \cdot V_{зд.}, \text{ руб.} \quad (5.17)$$

где: $C_{1м^3}$ – стоимость затрат на постройку 1 м³ здания, руб.;

$V_{зд.}$ – объем здания, м³.

Производственная площадь – 358,1 м², высота – 10 м. Полный объем здания – 3581 м³; стоимость 1 м³ – 16000 руб.; стоимость здания – 57296000 руб.

Таблица 5.3 – Затраты на санитарно-технические работы

Затраты	% от затрат на постройку здания	Цена, руб.
Отопление	5	2864800
Вентиляция	5	2864800
Водопровод	3	1718880
Канализация	3	1718880
Освещение	2	1145920
Итого	18	10313280

Общая стоимость здания составит:

$$C_{зд.} = C + \sum C_{затр.} = 57296000 + 10313280 = 67609280 \text{ руб.} \quad (5.18)$$

2) Расчет капитальных затрат на приобретение и монтаж оборудования.

Таблица 5.4 – Стоимость основного и вспомогательного оборудования

Наименование	Количество, шт.	Цена за шт., руб.	Цена, руб.
Агитатор	9	300000	2700000
Агитатор с тепловой рубашкой	4	450000	1800000
Выпарной аппарат	1	300000	300000
Емкость для сбора пульпы и растворов	6	400000	400000
Барабанная вращающаяся печь	2	5000000	10000000
Сублиматор	1	295000	295000
Барботажная колонна	1	200000	200000
Шнековый питатель	8	40500	324000
Центробежный насос	30	90000	2700000
Барабанный вакуумный фильтр	8	300000	2400000
Арматура и трубопроводы	—	2500000	2500000
Вспомогательное оборудование	—	2380000	2380000
Итого			31699000

Таблица 5.5 – Расходы на наладку и монтаж оборудования

Затраты	Цена, руб.
Устройство фундаментов	3000000
Кабельные разводки	2000000
КИПиА	2650000
Монтаж оборудования	3147400
Итого	10797400

Общие капитальные затраты (без стоимости помещения) составят:

$$C_{\text{кап.}} = C_{\text{обор.}} + \sum C_{\text{затр.}} = 31699000 + 10797400 = 42496400 \text{ руб.} \quad (5.19)$$

Таблица 5.6 – Полные капитальные затраты

Наименование	Капитальные затраты	
	руб.	%
Здание	67609280	61,40
Оборудование	42496400	38,60%
Итого	110105680	100

3) Общепроизводственные расходы.

Расходы на содержание здания:

Затраты на содержание здания составляют 3 % от стоимости здания:

$$З_{\text{сод.}} = 67609280 \cdot 0,03 = 2028278,40 \text{ руб/г.} \quad (5.20)$$

Затраты на текущий ремонт здания также составляют 3 % от стоимости здания:

$$З_{\text{т.р.}} = 67609280 \cdot 0,03 = 2028278,40 \text{ руб/г.} \quad (5.21)$$

Амортизационные отчисления на здание:

$$A_{\text{зд.}} = C_{\text{зд.}} \cdot \alpha = 67609280 \cdot \frac{1}{50} = 1352185,60 \text{ руб/г.} \quad (5.22)$$

где: α – коэффициент срока службы здания (50 лет).

Сумма затрат на содержание и эксплуатацию здания:

$$\begin{aligned} \sum Z_1 = Z_{\text{сод.}} + Z_{\text{т.р.}} + A_{\text{зд.}} = 2028278,40 + 2028278,40 + \\ + 1352185,60 = 5408742,40 \text{ руб/г.} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования:

Ремонтный фонд составляет 10 % от стоимости оборудования:

$$\Phi_{\text{т.р.}} = 42496400 \cdot 0,1 = 4249640 \text{ руб/г.} \quad (5.24)$$

Расходы на содержание составляет 5 % от стоимости оборудования:

$$З_{\text{сод.}} = 42496400 \cdot 0,05 = 2124820 \text{ руб/г.} \quad (5.25)$$

Отчисления на амортизацию оборудования (10 % от стоимости):

$$A_{об.} = C_{затр.} \cdot \alpha = 42496400 \cdot 0,1 = 4249640 \text{ руб/г.} \quad (5.26)$$

Сумма расходов на содержание и эксплуатацию оборудования:

$$\begin{aligned} \Sigma Z_2 &= \Phi_{т.р.} + Z_{сод.} + A_{об.} = 4249640 + 2124820 + 4249640 = \\ &= 10624100 \text{ руб/г.} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Общепроизводственные расходы составят:

$$Z_{общ.} = \Sigma Z_1 + \Sigma Z_2 = 5408742,40 + 10624100 = 16032842,40 \text{ руб/г.} \quad (5.28)$$

5.5 Расчет технологических затрат

Затраты на электроэнергию:

$$Z_{эл.} = C_{эл.} \cdot W \cdot T_{р.обор.} = 3,10 \cdot 354,50 \cdot 8184 = 8993806,80 \text{ руб/г.} \quad (5.29)$$

где: $C_{эл.}$ – стоимость 1 кВт ч электроэнергии, руб.[40].

W – потребляемая мощность, кВт;

$T_{р.обор.}$ – время работы оборудования в год, ч.

Затраты на освещение:

$$W_{осв.} = \frac{15 \cdot M \cdot m \cdot S_{п.}}{1000} = \frac{15 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 358,1}{1000} = 47054,34 \text{ кВт/г.} \quad (5.30)$$

где: 15 – количество Ватт на 1 м² пола;

$S_{п.}$ – площадь пола, м²;

M – количество часов искусственного освещения в сутки, ч;

m – число дней работы производства в году.

$$Z_{осв.} = 47054,34 \cdot 3,10 = 145868,45 \text{ руб/г.} \quad (5.31)$$

Затраты на вентиляцию:

$$W_{вент.} = P_{эл.дв.} \cdot 24 \cdot m = 45 \cdot 24 \cdot 365 = 394200 \text{ кВт/г.} \quad (5.32)$$

где: $P_{эл.дв.}$ – мощность электродвигателя, кВт.

$$Z_{вент.} = 394200 \cdot 3,10 = 1222020 \text{ руб/г.} \quad (5.33)$$

Затраты на отопление:

$$P_{\text{от.}} = \frac{a \cdot T \cdot V}{1000} = \frac{20 \cdot 4320 \cdot 3581}{1000} = 309398,40 \text{ кВт/г.} \quad (5.34)$$

где: a – количество тепла на 1 м³ помещения, кВт;

T – продолжительность отопительного сезона, ч;

V – объем отапливаемого помещения, м³.

$$З_{\text{от.}} = 309398,40 \cdot 3,10 = 959135,04 \text{ руб/г.} \quad (5.35)$$

Затраты, связанные с организацией труда (ОТ) и техникой безопасности (ТБ), принимаются равными 15% от полного годового фонда заработной платы:

$$З_{\text{ОТ+ТБ}} = 25835462,80 \cdot 0,15 = 3875319,43 \text{ руб/г.} \quad (5.36)$$

Отчисления на социальные нужды. Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от полного годового фонда заработной платы:

$$З_{\text{соц.}} = 25835462,80 \cdot 0,3 = 7750638,84 \text{ руб/г.} \quad (5.37)$$

5.6 Калькуляция себестоимости передела

Условно-переменные и условно-постоянные затраты приведены в таблице Г.8 в приложении Г. Проведем калькуляцию себестоимости передела.

Себестоимость составит:

$$C = 44541523,60 + 52778063,60 = 97319587,20 \text{ руб./г} \quad (5.38)$$

Цех выпускает товарную продукцию в виде кристаллогидрата фосфата натрия $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и концентрат оксидов РЗЭ. Рассчитаем выручку от реализации товара:

$$B = G \cdot Ц = 256567,123 \cdot 46 = 11802087,70 \text{ руб./г} \quad (5.39)$$

$$B = 100 \cdot 3769190,02 = 376919002 \text{ руб./г} \quad (5.40)$$

где G – количество производимого продукта, т/г;

$Ц$ – цена за 1 тонну, руб.

Общая выручка составит 388721090,70 руб./г, а прибыль:

$$\Pi = 388721090,70 - 97319587,20 = 291401503,50 \text{ руб./г} \quad (5.41)$$

Полученные технико-экономические показатели сведены в таблицу 5.7 и представлены ниже.

Таблица 5.7 – Техничко-экономические показатели

Капитальные затраты, руб.	110105680
Объем здания, м ³	3581
Условно-переменные затраты, руб.	44541523,60
Условно-постоянные затраты, руб.	52778063,60
Себестоимость передела, руб.	97319587,20
Выручка, руб	291401503,50

Основываясь на полученные данные, строится график безубыточности, который представлен в графической части.

Найдем точку безубыточности по формуле:

$$T_6 = \frac{Y_{\text{пер.}}}{C - C} = \frac{445415,23}{3769236,02 - 973195,87} = 14,65 \text{ т} \quad (5.42)$$

где: T_6 – точка безубыточности;

$Y_{\text{пер.}}$ – условно-переменные затраты на единицу продукции.

Также точку безубыточности можно найти графическим путем.

Рассчитаем выручку от реализации товара за месяц, по формуле:

$$\frac{B}{n_r} = B_m = \frac{291401503,50}{12} = 24283458,63 \text{ руб.} \quad (5.43)$$

где: n_r – количество месяцев в году;

B_m – выручка за месяц.

Найдем количество месяцев, через которые окупится проект, по формуле:

$$\frac{K}{B_m} = n = \frac{110105680}{24283458,63} = 4,5 \text{ мес.} \quad (5.44)$$

где: K – капитальные затраты;

n – количество месяцев за которые окупится проект.